Ein Beitrag zum Zeitgesetz der Entfestigung verformter Metalle

Von der
Technischen Hochschule in Breslau
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte
Dissertation

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. **Walter Scholz**
aus Kroischwitz, Kreis Bunzlau

Referent: Prof. Dr. F. Sauerwald
Korreferent: Prof. K. Gottwein
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 1931

Verlagsbuchhandlung Julius Springer in Berlin
1932

*24505

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus der „Zeitschrift für Physik", Band 73, Heft 7/8

Das Zeitgesetz der Entfestigung ist bisher kaum genauer untersucht worden. Bei seinem Studium ist anzustreben, Kristallerholung und Entfestigung durch Rekristallisation getrennt zu erfassen.

Diese Vorgänge können in ihrem zeitlichen Verlauf nur genau beobachtet werden, wenn man sie bei konstanter Temperatur verfolgt. Würde man so verfahren, daß man bei Raumtemperatur verformt, dann anläßt und wieder bei dieser Temperatur den Formänderungswiderstand feststellt, so wäre die Gefahr vorhanden, daß während der Zeit der Erwärmung und Abkühlung wesentliche Teile der Vorgänge verlaufen, die dann nicht erfaßt werden. Deshalb muß isotherm gearbeitet werden. Aus analogen Überlegungen heraus muß die Zeitdauer der Deformation zur Dauer der Entfestigung kurz gehalten werden. Höchstens wenn man sich durch Vergleich der so erhaltenen Zahlen mit nicht isotherm erhaltenen unter bestimmten Verhältnissen davon überzeugt hat, daß die Fehler beim Erwärmen bzw. Abkühlen zu vernachlässigen sind, kann man zu dem experimentell einfacheren, nicht isothermen Verfahren übergehen.

Die Ausführung eines Versuches ist, kurz beschrieben, folgende[1]): Zwei Proben werden in einem Ofen erhitzt, und bei der gewollten Versuchstemperatur in einem Fallwerk dynamisch gestaucht. Nach dem Stauchen werden die Proben möglichst schnell, um eine Abkühlung zu vermeiden, in einen zweiten Ofen mit derselben Temperatur gebracht und darin eine bestimmte Zeit der Entfestigung überlassen. Danach wird eine Fallhärtebestimmung bei der betreffenden Temperatur ausgeführt, um die eingetretene Entfestigung zu ermitteln. Kurz zuvor ist die oberste Probe in Wasser abgeschreckt worden, um die Brinellhärte, die als Vergleich

[1]) Vorbereitende Arbeiten wurden von den Herrn Mikliss und Ober ausgeführt. Vgl. auch den Bericht in der ZS. f. Elektrochem. **37**, 531, 1931.

zur Fallhärte dienen soll, zu bestimmen. Bei der Fallhärteprobe wird, nach entsprechender Vorbereitung, die Kristallisation untersucht und ausgewertet.

In folgendem soll auf die Bestandteile der Apparatur näher eingegangen werden.

Bestandteile der Apparatur.

1. Anheizofen. Zur Erhitzung der Proben auf die gewünschte Versuchstemperatur diente ein Widerstandsofen von 100 mm lichter Weite und 300 mm Höhe.

Amboß. Um die Temperatur der Proben möglichst konstant zu halten, wurden die zu erhitzenden Proben (es wurden jeweilig zwei für einen Versuch benutzt, um das an ihren Berührungsflächen auftretende Maximum der Verfestigung auszunutzen) in einem tiegelartigen Amboß eingebaut und auch darin transportiert, dessen Konstruktion im Prinzip aus Fig. 1 zu ersehen ist. Außerdem wurden die Proben mit einer Haube bedeckt, die durch Bajonettverschluß auf den Amboß aufgesetzt wurde. Die Maße des Ambosses waren 75 mm Durchmesser, Höhe 50 mm. Die Proben selbst kamen auf einen Einsatz aus NCT_3-Stahl zu stehen, der bei den angewendeten Temperaturen (bei Kupfer 250 bis 350° C und Weicheisen 500 bis 600° C) durchaus genügende Festigkeit besaß und nicht verzunderte.

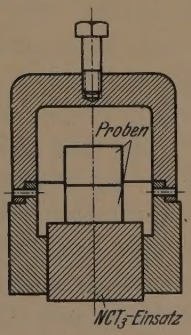

Fig. 1.
Amboß für Stauchung und Fallhärtebestimmung.

Thermoelement. Durch einen Schlitz in der zylindrischen Seitenwand des Ambosses wurde zwecks Temperaturmessung ein geeichtes Eisen-Konstantanelement (Drahtstärke 0,4 mm) eingeführt, das bis in eine 2 mm starke und 1 bis 1,5 mm tiefe seitliche Bohrung des unteren Probezylinders reichte. Bei längeren Versuchszeiten wurde die Temperatur selbsttätig durch einen *Temperaturschreiber* registriert.

2. Stauchapparat. Das Stauchen der Proben wurde mit einem Fallwerk vorgenommen, in dem ein ungefähr 15 kg schwerer Fallbär aus einer Höhe von 1050 mm auf die Proben fallen gelassen wurde. Der Fallbär besteht aus einem schmiedeeisernen Zylinder, auf dessen unterer Fläche eine Platte aus gehärtetem Stahl aufgeschraubt ist. Ein hoher schwerer Gußeisenblock, der mit einem Anschlag versehen war, diente als Widerlager für den Amboß.

3. Entfestigungsofen. Die im Fallwerk gestauchten Proben wurden in einem Widerstandsofen von gleicher Abmessung wie der eingangs beschriebene bei der gewünschten Versuchstemperatur während der gewollten Versuchszeit belassen.

4. Fallhärteprüfer. Zur Bestimmung der Fallhärte diente ein Apparat, der von Wüst und Bardenheuer[1]) konstruiert und von Knehans[2]) verbessert worden war.

Versuchsausführung.

Proben. Von Aluminium und Kupfer wurden Proben von 15 mm und von Eisen von 10 mm Höhe abgesägt. Der Durchmesser betrug bei den Aluminium- und Kupferproben 15 mm; bei den Eisenproben wurde zwecks Erzielung von genügend starker Deformation durch Abdrehen der Durchmesser auf 13 mm verringert. Zu den Versuchen wurde nur praktisch seigerungsfreies Eisen benutzt.

Vorbereitung der Proben für den Versuch. Die Verwendung der Proben erfolgte in der Reihenfolge, wie sie vom Stab geschnitten wurden, um eine eventuelle Ungleichmäßigkeit im Material feststellen und berücksichtigen zu können. Die Vorglühung bei Aluminium und Kupfer wurde in einem sauerstofffreien Argonstrom, bei Eisen ohne besondere Schutzmaßnahmen vorgenommen, da die Proben infolge des niedrigen Kohlenstoffgehaltes von 0,029% nicht verzunderten, Die Abkühlung erfolgte im Ofen. Die normalisierten Proben wurden an den Stirnflächen auf Schmirgelpapier 00 planparallel geschliffen.

Einbau der Proben in den Amboß und Temperaturmessung. Zu jedem Versuch wurden zwei Proben verwendet. Dieselben wurden aufeinandergesetzt und die erzielte Verfestigung bzw. Entfestigung auf den sich berührenden Stirnflächen gemessen. Zwei Proben wurden aus folgendem Grunde gewählt: Man kann annehmen, daß sich der Bereich der durch die Stirnflächen behinderten Verformung nur auf ein, etwa der Länge des Zylinderhalbmessers entsprechendes Stück von der Preßfläche aus in das Innere der Probe erstreckt. Der Verfestigungseffekt war entsprechend dem stärkeren Fließvorgang auf den inneren Flächen sehr viel größer als auf den äußeren.

---

[1]) Mitteilung aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Eisenforschung I, 1920, Seite 1.

[2]) F. Sauerwald u. K. Knehans, ZS. f. anorg. Chem. **140**, 227, 1924.

Nach Erhitzung im Ofen I auf Versuchstemperatur wurden die Proben im Amboß unter das Fallwerk gebracht und gestaucht. Es wurde bei der Vorbereitung zum Stauchen so schnell gearbeitet, daß ein meßbarer Temperaturabfall während des Herübersetzens in das Stauchwerk nicht festzustellen war. Die Wärmeableitung durch den Fallbären und der Transport vom Fallwerk zum Ofen II bedingte noch einen Temperaturabfall von 2 bis 3° C unter die Versuchstemperatur, nachdem die Temperatur durch das Stauchen erst hier um 7 bis 8° C über Versuchstemperatur gestiegen war. Es mußte Ofen II für ganz kurze Zeit derart reguliert werden, daß die Proben in kürzester Zeit (20 bis 30 Sekunden) wieder auf die gewünschte Versuchstemperatur kamen.

Glühen bei Versuchstemperatur und Ausführung der Härtebestimmung. Ofen II mußte möglichst genau auf der Versuchstemperatur gehalten werden. Nach der gewünschten Entfestigungszeit wurde der Amboß unter den Wüstschen Fallhärteapparat gebracht, der Deckel und die obere Probe abgehoben, und die untere Probe der Fallhärteprüfung unterzogen. Bei Aluminium und Kupfer konnte die obere Probe leicht abgenommen werden, ohne daß sie ein einziges Mal durch das Stauchen mit der unteren zusammengeschweißt wäre. Bei Versuchen, die mehr als 4 Stunden währten, wurde bei Kupfer eine schwache Oberflächenoxydation der Proben festgestellt, die eine höhere Fallhärte zur Folge hatte. Durch Aufstreuen von Holzkohlepulver auf die untere Probe wurde die Oxydation etwas vermindert, was die Versuchsergebnisse, die mit und ohne diesen Oxydationsschutz angestellt wurden, bestätigten. Dagegen verzunderten und verschweißten die Eisenproben ohne weiteres ständig, da diese Versuche bei höheren Temperaturen (530 bis 600° C) ausgeführt wurden. Um eine Oxydation und ein Zusammenbacken zu vermeiden, wurden die Eisenproben zuerst galvanisch verkupfert bzw. zwischen die aufeinander sitzenden Stirnflächen eine hauchdünne Schicht von MgO-Pulver gebracht. Diese Mittel erwiesen sich jedoch als unzureichend. Befriedigende Resultate ergaben sich, wenn die Eisenproben mit einer übersättigten Lösung von Bariumchlorid bestrichen wurden. Dasselbe bildet bei den in Frage kommenden Temperaturen eine dichte Glasur und verhindert so mechanisch den Zutritt des Sauerstoffs der Luft. Die sehr dünne Salzschicht ließ sich unmittelbar vor der Fallhärtebestimmung mittels eines Eisenspatels sehr rasch und bequem entfernen.

Die obere Probe wurde sofort in Wasser abgeschreckt und *sogleich* auf der inzwischen blank geschliffenen unteren Stirnfläche bei *allen Versuchen* auf Brinellhärte (H 5/250/30) geprüft.

Die *Ermittlung des mittleren Korndurchmessers* bzw. des Kernquerschnitts[1]) wurde an Schliffen der unteren Probe vorgenommen. Bei Kupfer trat eine sehr starke Zwillingsbildung auf. Ein Zwilling wurde als zwei Körner ausgezählt. Dagegen zeigte das Kruppsche Weicheisen diese Erscheinung nicht.

Versuchsergebnisse.

1. Versuche mit Aluminium. Mit den so ausgeglühten Proben wurde eine Versuchsreihe über Entfestigung bei 300° C ausgeführt. Die Versuche an Aluminium führten nicht zu genügend genauen Ergebnissen, da die maximal erzielte Verfestigung nur neun Fallhärteeinheiten bei einem Stauchgrad von ungefähr 16% betrug.

2. Versuche mit Elektrolytkupfer. Als Material für weitere Versuche diente Elektrolytkupfer (K_1 und K_2). Das zunächst verwendete soll mit K_1 bezeichnet werden. Ehe die Kupferproben versuchsfertig waren, mußten alle Walzspannungen und Verfestigungen beseitigt werden. Deshalb wurden die Proben bei 500° C 1, $1^1/_2$, 2 und 3 Stunden ausgeglüht. Die Härte (H 5/250/30) von K_1 betrug

im Anlieferungszustand							54,3	kg/mm²
nach 1	Stunde	Ausglühen	bei	500° C	im	Argonstrom . .	51,0	„
„ $1^1/_2$	Stunden	„	„	500° C	„	„ . .	48,1	„
„ 2	„	„	„	500° C	„	„ . .	47,1	„
„ 3	„	„	„	500° C	„	„ . .	47,1	„

Daraus geht hervor, daß eine zweistündige Glühung von K_1 genügt, um die im Anlieferungszustand vorhandene Verfestigung zu beseitigen.

Es wurde zunächst noch die Fallhärteprüfung an ausgeglühten, ungestauchten Kupferproben (Kupfer K_1) bei Temperaturen zwischen 225 und 350° C vorgenommen. Die so ermittelten Fallhärten sollen für einen größeren Temperaturbereich den Endwert angeben, dem die Härtewerte bei der Entfestigung bei diesen Temperaturen zustreben. Die Entfestigungsgeschwindigkeit bei 350 und 325° (Fig. 2) ist noch sehr groß. Es wurden deshalb Versuche mit Kupfer K_1 bei tieferen Temperaturen angestellt, wo besonders der Anfang der Kurven genauer erfaßt werden kann.

Betrachten wir zuerst das Versuchsergebnis von 300° C (Fig. 3). Nach 20 Minuten ist sowohl bei der Fallhärte als auch bei der Brinellhärtekurve vollkommene Entfestigung eingetreten. Der Verlauf der Kurven in Fig. 3 zeigt noch nichts Außergewöhnliches.

[1]) F. Sauerwald, Lehrbuch der Metallkunde. S. 51. Berlin, Springer, 1929.

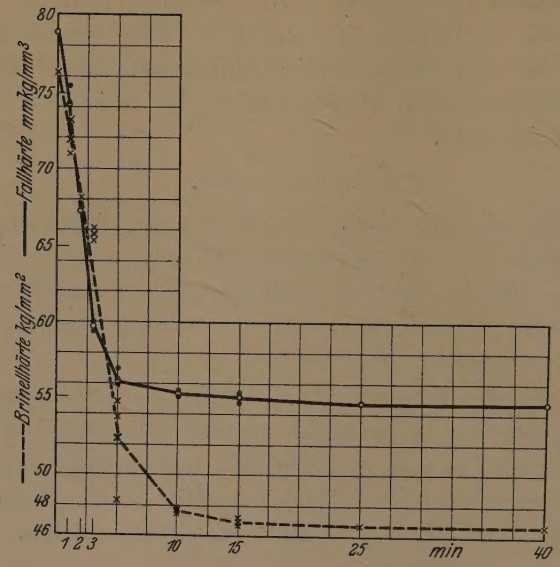

Fig. 2.
Entfestigung von Kupfer K_1 bei 325°.

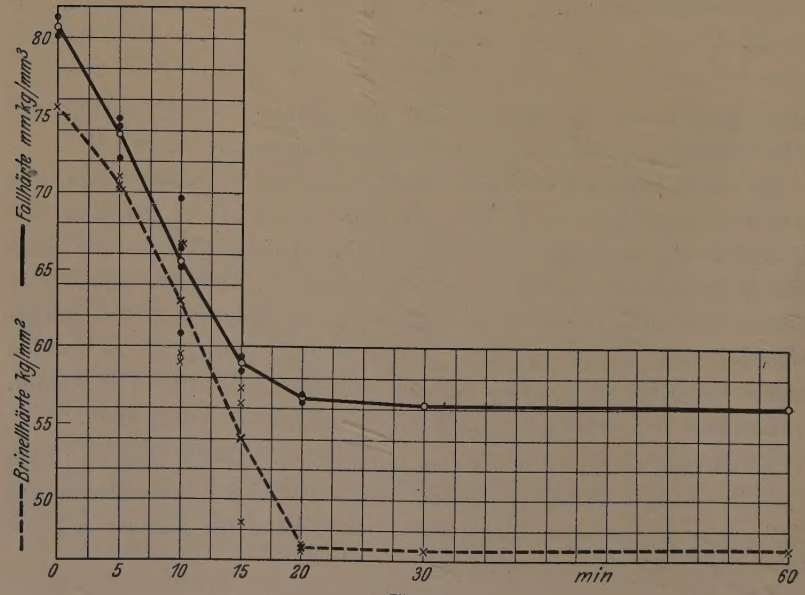

Fig. 3.
Entfestigung von Kupfer K_1 bei 300°.

Bei 275° C (Fig. 4) tritt nach 30 Minuten ein schwach ausgeprägter Wendepunkt auf; bei der Brinellkurve tritt diese Erscheinung noch sehr viel undeutlicher hervor. Hier ist zum ersten Male gleichzeitig mit der Entfestigung die Kristallisation untersucht worden. Die Kristallisationskurve zeigt nach einem Minimum des mittleren Korndurchmessers bei etwa

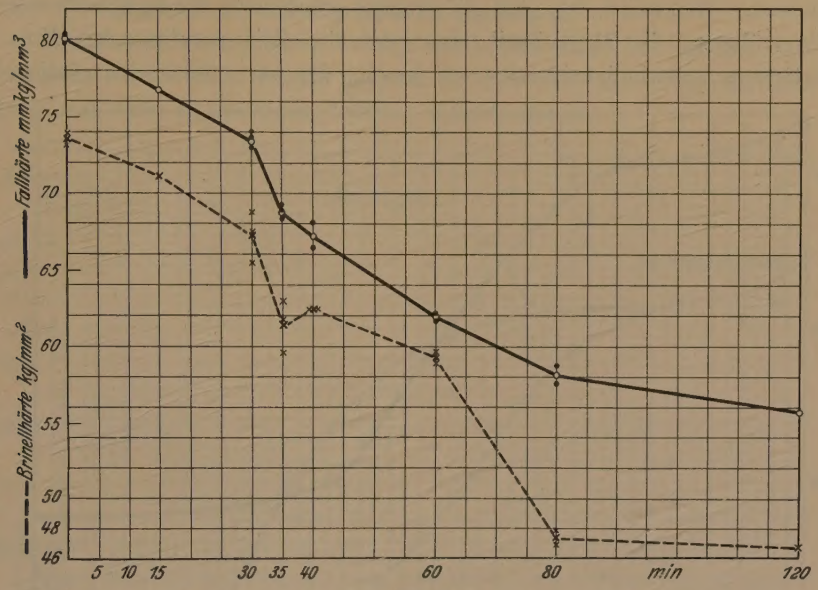

Fig. 4.
Entfestigung von Kupfer K_1 bei 275°.

30 Minuten ein stärkeres Anwachsen der Kristallisation. Infolge der natürlichen Streuungen der Korngröße zeigen die Einzelzählungen ziemlich erhebliche Schwankungen. Trotzdem scheint bemerkenswert, daß vom Zeitpunkt der deutlichen Rekristallisation an auch die Entfestigung schneller zunimmt.

Fig. 5 gibt die erste Reihe der Versuchsergebnisse, die bei 250° C ermittelt wurden, wieder. Hier ist nun sehr deutlich ein Wendepunkt in der Kurve zu beobachten.

Bei einer zweiten Reihe trat die Entfestigung erst erheblich später auf, trotz des genau identischen Untersuchungsverfahrens. Es wurde vermutet, daß Härteunterschiede des Materials nach dem normalisierenden Glühen die Ursache sein könnten. Deshalb wurde auf der Unterseite der letzten Probe, mit der die Fallhärtebestimmung vorgenommen wurde, *vor* dem Versuch die Brinellhärte bestimmt. Unterschiede

in ausgeglühtem Material waren nicht festzustellen. Dieser Umstand des gleichmäßigen Verhaltens von Brinell- und Fallhärten läßt darauf schließen, daß an dem widersprechenden Ergebnis nicht etwa die Härtebestimmung Schuld ist. Die Ergebnisse lassen vermuten, daß geringe, schon erfaßbare Faktoren den Entfestigungsvorgang wesentlich beeinflussen können. Wesentlich ist, daß die zuletzt erhaltenen Werte ebenso wie die früheren, die Möglichkeit einer mit der Zeit zunehmenden Entfestigungsgeschwindigkeit erkennen lassen. Es war auch nicht möglich,

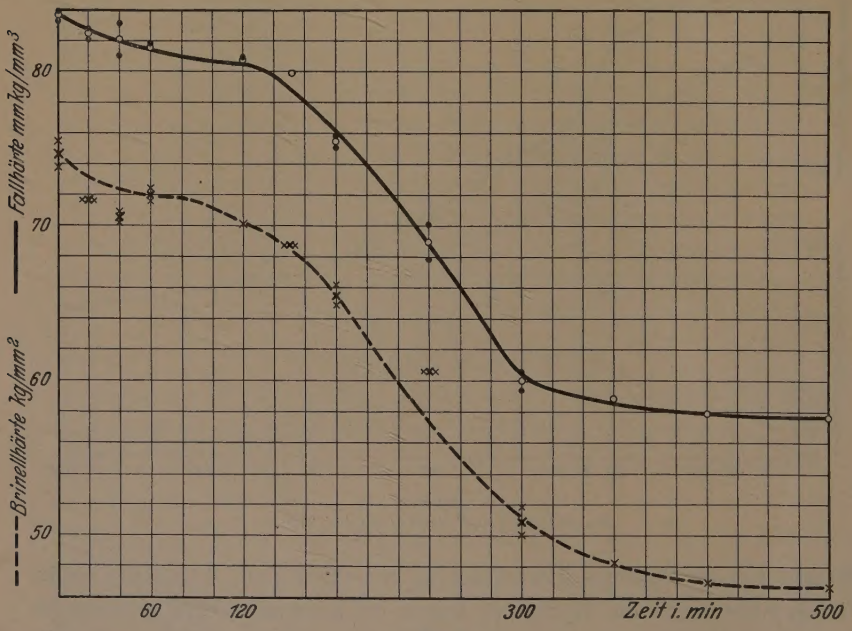

Fig. 5.
Entfestigung von Kupfer K_1 bei 250°.

andere diesbezügliche Untersuchungen darüber anzustellen, da es die letzten zehn Proben des Materials K_1 waren, bei denen die hohen Härtewerte auftraten.

Die Proben, die zur aufgetragenen Kurve mit dem Wendepunkt bei 150 Minuten gehören, wurden benutzt, um die dazugehörige Kristallisation (Fig. 6) zu untersuchen. Das stärkere Kornwachstum beginnt etwa ab 120 Minuten, wo auch die Entfestigungsgeschwindigkeit größer wird.

Zu weiteren Versuchen stand ein härteres Material K_2 (auch Elektrolytkupfer) zur Verfügung. Im Anlieferungszustand betrug die Härte H 5/250/30 51,9 und 53,8 kg/mm².

Die Glühversuche ergaben nach:

1 Stunde	Ausglühen bei	500° C	im Argonstrom	49,7 kg/mm²
2 Stunden	„	„	500° C „ „	48,2 „
3 „	„	„	500° C „ „	48,2 „

Es genügte auch hier eine zweistündige Glühung, um die im Anlieferungszustand vorhandenen Verfestigungen zu beseitigen.

Mit den so vorbereiteten Proben wurde eine Versuchsreihe über Entfestigung bei 250° C in Angriff genommen. Nur eine sehr geringe Entfestigung war nach 24stündigem Glühen wahrzunehmen.

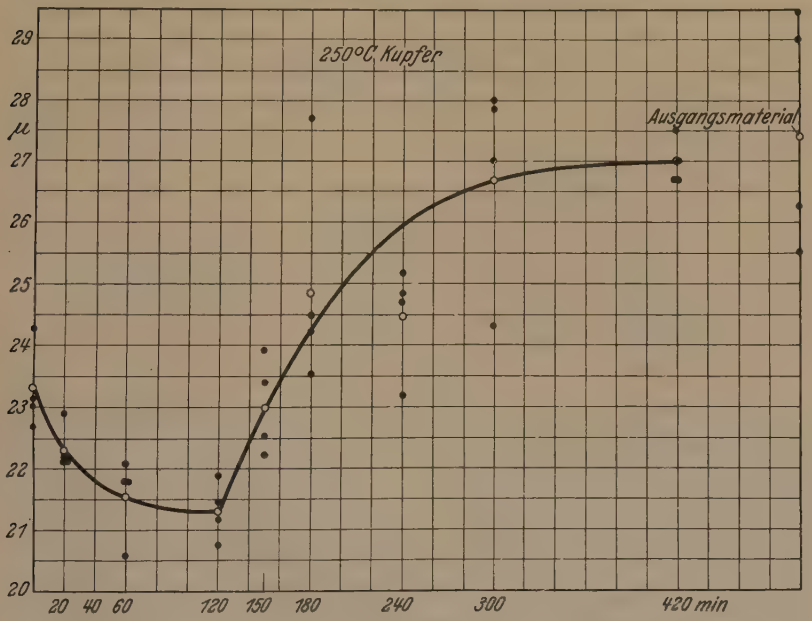

Fig. 6.
Änderung des Korndurchmessers bei der Rekristallisation von Kupfer K_1 bei 250°.

Die Versuche bei dieser Temperatur wurden abgebrochen und eine Versuchsreihe bei 275° C begonnen. Entsprechend der höher gewählten Temperatur geht die Verfestigung in der Zeiteinheit schneller zurück: nach 24 Stunden 6 Fallhärten und nach 48 Stunden schon 21 Fallhärten. Es hat demnach den Anschein, als ob eine Beschleunigung der Entfestigungsgeschwindigkeit nach 24 Stunden eingetreten wäre. Da dieselbe bei dieser Temperatur noch sehr klein ist und nach sehr langen Zeiten eine geringe Änderung des Formänderungswiderstandes eintritt, wurde auch diese Versuchstemperatur verlassen.

Besseren Aufschluß bringt nun die Versuchsreihe, die bei 300° C ebenfalls mit Material K_2 ausgeführt wurde. Infolge der nicht allzulangen Versuchszeiten konnten die einzelnen Punkte mit mehr Werten belegt werden, um dadurch ein möglichst genaues und sicheres Bild des Verlaufes des Kurvenzuges zu bekommen. Diese Fallhärtekurve zeigt besonders deutlich einen Wendepunkt bei 180 Minuten, weshalb diese ausgezeichnete und wichtige Erscheinung durch viele Versuche fixiert wurde. Bei der Brinellhärtekurve liegt der Wendepunkt etwa in demselben Zeitintervall.

Im Rückblick ist über die mittlere Entfestigungsgeschwindigkeit der einzelnen Versuchsreihen und über ihre Temperaturabhängigkeit noch folgendes festzustellen: Die mittlere Entfestigungsgeschwindigkeit wird errechnet, indem man die durch das Stauchen erhaltene Gesamtverfestigung durch die Zeit dividiert, bei der eine vollkommene Entfestigung bei einer bestimmten Temperatur eingetreten ist. Eine Zusammenstellung soll folgende Tabelle geben:

K_1	250°	in 360	Min.	24	F.H.	= 0,066
K_1	275	„ 120	„	23	„	= 0,192
K_1	300	„ 20	„	24	„	= 1,2
K_1	325	„ 15	„	24	„	= 1,6
K_1	350	„ 5	„	27	„	= 5,4
K_2	300°	in 720	Min.	23	F.H.	= 0,032

(mittlere Entfestigungsgeschwindigkeit)

Daraus ist zu ersehen, daß die mittlere Entfestigungsgeschwindigkeit nach niederen Temperaturen hin sehr klein wird. Bei dieser Zusammenstellung ist das Vorhandensein des Wendepunktes außer acht gelassen, um die Rechnung zu vereinfachen. Trägt man die mittlere Entfestigungsgeschwindigkeit auf der Ordinate, die dazugehörige Temperatur auf der Abszisse auf, so verläuft die Kurve annähernd nach einer Exponentialfunktion. Von großer Bedeutung ist die Beobachtung, daß die beiden so ähnlichen Materialien K_1 und K_2 sich bei recht verschiedenen Temperaturen entfestigen, so daß offenbar kleine Beimengungen und andere Nebenumstände eine große Rolle spielen. Trägt man die Entfestigung und die Entfestigungszeit prozentisch auf, so zeigt sich, daß trotzdem alle Kurven ihren individuellen Charakter behalten.

3. Versuche mit C-armem Weicheisen. Nach diesen Versuchen an Elektrolytkupfer wurden Entfestigungsversuche mit Eisen vorgenommen. Als solches diente ein Weicheisen mit 0,029% C. Durch verschieden langes Ausglühen mußte die Zeit bestimmt werden, bei der die Walzspannung und Verfestigung beseitigt werden konnte. Die Ausglühtemperatur betrug 650° C.

Härte im Ausgangszustand H 5/250/30	95,2 kg/mm²
Nach halbstündiger Glühung bei 650° C	83,0 „
Nach einstündiger Glühung bei 650° C	82,1 „
Nach zweistündiger Glühung bei 650° C	83,0 „

Es genügte also halbstündiges Ausglühen, um die Proben spannungsfrei zum Versuch verwenden zu können. Wie in einer anderen Untersuchung festgestellt wurde, wird das Weicheisen durch Abschrecken von 550 bis 600° C um $\sim$ 8 Brinelleinheiten härter. An den Zeitkurven für die Brinellhärten bringt dieser konstante Betrag keine Änderung hervor.

Die Möglichkeit eines anderen Effektes war noch zu untersuchen, ehe mit den Versuchen begonnen werden konnte, und zwar war es der denkbare Einfluß einer Änderung des C-Gehalts des α-Mischkristalls während der Entfestigung.

24 Proben (13 mm Durchmesser und 10 mm Höhe) wurden eine halbe Stunde bei 650° C geglüht und langsam abgekühlt. Davon wurden in Anlehnung an die folgenden Versuche 6 Proben eine halbe Stunde, 6 Proben zwei Stunden und 6 Proben sechs Stunden bei 500° C ausgeglüht. 6 Proben wurden nicht geglüht. Sämtliche Proben wurden bei 500° C um ungefähr 14,5% gestaucht und auf Brinellhärte untersucht. Und zwar je 2 Proben nach 7 Sekunden, 2 nach 15 Minuten und 2 nach 6 Stunden Entfestigungsdauer bei 500° C. Die Ergebnisse sind bei:

6 Proben nicht geglüht			6 Proben $^1/_2$ Std.	6 Proben 2 Std.	6 Proben 6 Std. bei 500°
2 „	nach 7 Sek. H 5/250/30	157	155	159	155
2 „	15 Min.	144	140	138	136
2 „	6 Std.	135	136	136	133

Hieraus ist ersichtlich, daß eine Alterung sich nicht bemerkbar macht, da die Härten unabhängig von der Dauer der vor der Deformation vorgenommenen Glühung bei 500° sind und somit der C-Gehalt des α-Mischkristalls dem Gleichgewicht entspricht.

Die Oxydationsbehinderung durch Bestreichen der Proben mit Bariumchlorid (S. 514) hatte Erfolg bei den orientierenden Versuchen, die bei 580° C (Stauchgrad 12,2%), 560, 550 (Stauchgrad 12,1%) und 540° C (Stauchgrad 12,1%) angestellt wurden. Die Fall- und Brinellhärten sind für 580 und 550° in Fig. 7 und 8 eingezeichnet. Eine vollkommene Entfestigung wurde nur bei 580° und 560 erzielt, und zwar bei 560° in etwa 15 Stunden. Bei 540° betrug die Brinellhärte nach dieser Zeit noch 121. Ein Wendepunkt ist nicht vorhanden.

Die Kristallisation ist beispielsweise für 500° in Fig. 9 wiedergegeben. Von 300 Minuten an fällt es auf, daß die Werte große Unterschiede aufweisen, die bei größerem Korn immer krasser werden. Dies rührt offenbar

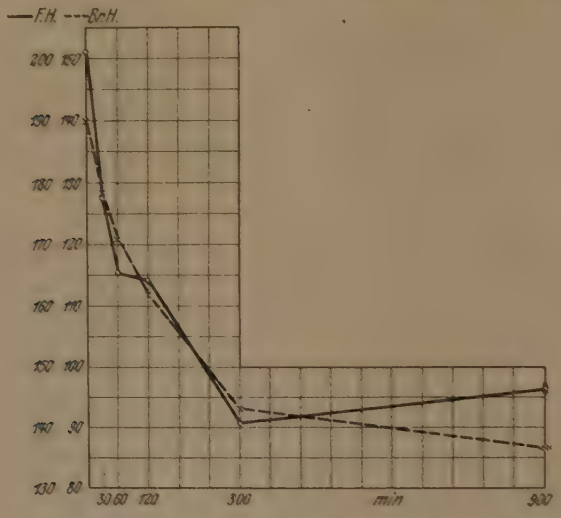

Fig. 7.

Entfestigung von Weicheisen bei 580°.

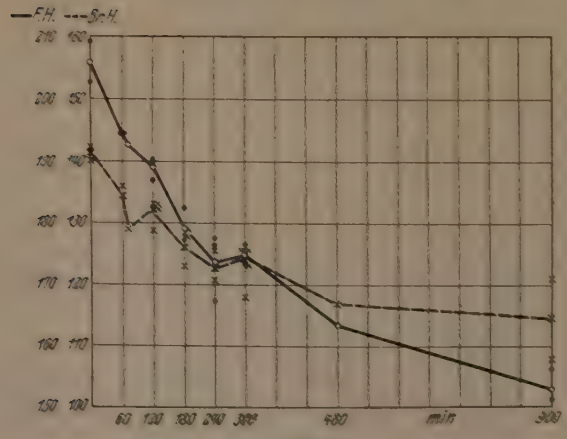

Fig. 8.

Entfestigung von Weicheisen bei 550°.

her vom Unterschied des Verformungsgrades in verschiedenen Zonen. Bemerkenswert ist, daß das erhebliche Kornwachstum auftritt, während die Entfestigung sich nur langsam und unvollständig vollzieht.

Bisherige Arbeiten über Entfestigung.

Über den zeitlichen Verlauf der Entfestigung liegen bis jetzt wohl nur technologische Versuche vor. Dabei wurden die zu untersuchenden Materialien bei Raumtemperatur verformt, dann angelassen und verschieden

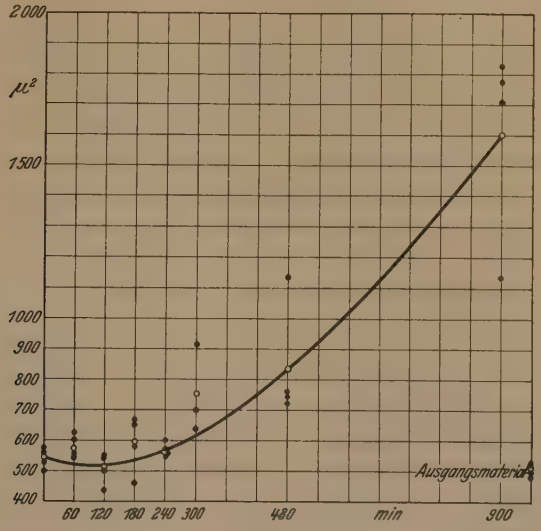

Fig. 9.
Änderung des Kernquerschnitts bei Rekristallisation von Weicheisen bei 550°.

lange ausgeglüht. Strukturänderungen, die dabei auftraten, wurden ebenfalls berücksichtigt. Es sollen im folgenden solche Arbeiten genannt werden, die insbesondere zur Frage des Auftretens einer Induktionsperiode bei der Entfestigung einen Beitrag liefern können.

Eine solche Arbeit liegt von Grard[1]) vor. Die Versuche über die Entfestigung von Patronenmessing 67/33 lassen bei der Festigkeits-Zeitkurve einen Wendepunkt vermuten.

Dagegen widersprechen ähnliche Versuche von Martens und le Chatelier[2]) an Kupfer denen von Grard. Ein Wendepunkt der Entfestigungskurven ist nicht aufzufinden.

Wichtig ist eine Arbeit von Bohner[3]), der die Zugfestigkeits- und Leitfähigkeitsänderung hartgezogener Drähte an Kupfer (99,95%) und Legierungen unter dem Einfluß kurzzeitiger Erwärmung untersuchte.

---

[1]) Metallurgie **8**, 651, 1910.
[2]) W. Müller, Metall u. Erz 1913, S. 219, Heft 8.
[3]) H. Bohner, ZS. f. Metallkde. **20**, 132, 1928.

Für die eigene Arbeit ist es von besonderem Interesse, daß seine Ergebnisse von Kupfer, dessen Festigkeits-Zeitkurve bei 430 und 325° C (vgl. 350 und 325° C der eigenen Versuchsergebnisse), keine Abnormität zeigen. Nach niederen Temperaturen hin weisen sie aber Andeutungen über das Auftreten des Wendepunktes auf.

Bei solchen Untersuchungen über Eisen sind, soweit bekannt, in keinem Falle Beobachtungen einer Induktion gemacht worden. Eine Arbeit von Goerens[1]) über den Einfluß der Wärmebehandlung auf die Eigenschaften bei Raumtemperatur kalt bearbeiteten Flußeisens (0,08% C) zeigt einen normalen Verlauf der Kurven.

Die Dissertation von Haase[2]) über die Erholung von Einkristallen ist leider für unsere Betrachtungen kaum heranzuziehen.

Deutung der Versuchsergebnisse

Die Mannigfaltigkeit der Kurven der einzelnen Versuchsreihen, die auch erhalten bleibt, wenn die Koordinaten auf rationelle Weise vergleichbar gewählt werden, beweist schon, daß es nicht ohne weiteres möglich ist, ein allgemein gültiges Zeitgesetz der Gesamtentfestigung aufzustellen.

Für die allgemeine Deutung bestehen verschiedene Möglichkeiten; den Wendepunkt in den Entfestigungskurven von Kupfer, der das Maximum der Entfestigungsgeschwindigkeit darstellt, kann man erstens auf die Überlagerung von zwei Vorgängen zurückführen. Es sind dies die Kristallerholung und die Entfestigung durch Rekristallisation. Diese beiden Vorgänge konnten im Verlauf der Untersuchung nicht genauer getrennt erfaßt werden. Aus dem Vergleich der Kurven für Entfestigung und Rekristallisation wird es immerhin nahegelegt, daß die Erhöhung der Entfestigungsgeschwindigkeit auf die mit der Zeit stärker einsetzende Rekristallisation zurückzuführen ist. Mit der Wirksamkeit beider Faktoren ist ferner die Tatsache in Einklang zu bringen, daß der Wendepunkt bei den tieferen Temperaturen auftritt. Bei diesen Temperaturen geht die Rekristallisationsgeschwindigkeit schneller zurück als die Erholungsgeschwindigkeit, so daß beide von ähnlicher Größenordnung werden.

Wenn sich nach weiteren eingehenderen Versuchen herausstellen sollte, daß sich die Induktionsperiode auf die gleichzeitig mit der Gesamtentfestigung zusammen verlaufende Kristallisation nicht zurückführen ließe und dadurch die bereits oben ausgeführte Deutung hinfällig würde,

---

[1]) P. Goerens, Ferrum 1913, S. 220.
[2]) O. Haase, Dissertation Berlin 1924.

was jedoch wenig wahrscheinlich ist, so müßte man *nur* die Kristallerholung für die Vorgänge verantwortlich machen. Unter Umständen ist es möglich, die Theorie der Verhakungen von Dehlinger[1]) hier heranzuziehen, allerdings müßte sie modifiziert werden.

Dehlinger machte — wenigstens bisher — die Gitterverhakungen nicht verantwortlich für die Verfestigung. So eng dürfte man hier diesen Begriff nicht fassen, sondern man müßte weitergehen und die Verfestigung mit Gitterverhakungen in Zusammenhang bringen. Diese Auffassung erscheint durchaus plausibel. Eine der wichtigsten Eigenschaften der Gitterverhakungen ist nun, daß sie sich gegenseitig stabilisieren. Wenn nun durch die thermische Behandlung (Ausglühen der Proben bei einer bestimmten Temperatur) eine gewisse Anzahl von Verhakungen aufgelöst werden, werden die anderen weniger stabil, sie lösen sich auch auf, ihre Lösungsgeschwindigkeit und damit die Entfestigung nimmt mit der Zeit zu. Diese Auffassung wäre also in der Lage, eine Induktion bei der Entfestigung zu deuten.

Eine andere Auffassung, wie eine Induktionsperiode der Kristallerholung gedeutet werden kann, hat Tammann[2]) genannt. Danach gehen zuerst die wenig zahlreichen Gitterteile mit sehr hoher Verfestigung, dann die zahlreicheren mittlerer Verfestigung und schließlich die wenig zahlreichen geringer Verfestigung in den Ausgangszustand zurück. Von einem bestimmten zahlenmäßigen Verhältnis der verschieden verfestigten Bereiche an ist in der Tat eine Induktion zu erwarten. Endgültige weitere Aufschlüsse über die verschiedenartigen Erscheinungen können nur durch neue eingehende Untersuchungen erwartet werden, die bereits im Gange sind.

Breslau, Technische Hochschule.

---

[1]) U. Dehlinger, Ann. d. Phys. (5) **2**, 749, 1929.
[2]) G. Tammann, ZS. f. Elektrochem. **37**, 534, 1931.

Herrn Professor Dr. F. Sauerwald, der mir die Anregung zu dieser Arbeit gab und unter dessen Leitung dieselbe zu Ende geführt wurde, spreche ich hiermit meinen ergebensten Dank aus.

Lebenslauf

Ich, Walter Scholz, wurde am 25. April 1903 zu Kroischwitz, Kreis Bunzlau, als Sohn des Vorwerksbesitzers Richard Scholz geboren, besuchte daselbst die Volksschule und trat 1913 in die Sexta des Reform-Realgymnasiums zu Löwenberg i. Schl. ein. 1922 bestand ich die Reifeprüfung, praktizierte bis November 1923 und widmete mich bis Mai 1929 dem Studium der Eisenhüttenkunde an der Technischen Hochschule zu Breslau. Nach bestandener Diplom-Hauptprüfung arbeitete ich anschließend an dieser Hochschule unter Leitung von Herrn Prof. Dr. F. Sauerwald an meiner Doktor-Dissertation und promovierte am 22. Juli 1931 zum Doktor-Ingenieur.

Printed in Germany